



## 현장에서의 열회수형 환기설비 필터 여과 효율 측정 방법 비교

### Comparison of On-Site Test Methods for Evaluating Fine Particle Filtration Efficiency in Residential Heat Recovery Ventilation System

정한웅\* · 강경모\*\*

Hanung Jeong\* · Kyungmo Kang\*\*

\* Main author, Bachelor Student, Division of Architectural Engineering, Daejin Univ., Pochon, Korea (hanungj3765@gmail.com)

\*\* Corresponding author, Assistant Professor, Division of Architectural Engineering, Daejin Univ., Pochon, Korea (kyungmo@daejin.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** People in Korea spend about 90% of their daily life indoors, making indoor air quality an important health factor. Ventilation is necessary to improve indoor air quality, but this process also allows outdoor fine particles to enter the indoor space. Such particles can be reduced using mechanical ventilation systems. However, domestic studies on the actual fine particle filtration efficiency of HRV remain limited. **Method:** An HRV system was installed and operated in a full-scale residential test house. Three types of filters were tested: 40%, 90%, and HEPA (H13). Filtration efficiency was evaluated using both the Upstream-Downstream method and the Material Balance Equation method. To assess the impact of the HRV and the duct system, the Upstream-Downstream method was applied at different supply air (SA) duct sampling points. **Result:** For particles in the 0.3–1.0 $\mu\text{m}$  range, the 40% filter showed an efficiency of 27.9% at a duct length of 2m, which increased to 34.2% at 9.4m (a gain of 6.3 percentage points). In contrast, the 90% and HEPA filters showed changes within  $\pm 0.1\%$  across all duct lengths. In comparing the two evaluation methods, the MB method produced higher values for the 40% filter but lower values for the 90% and HEPA filters than the UD method. The difference between methods was greatest for 0.3–1.0 $\mu\text{m}$ , which is also the most harmful size range for health. This result shows that MB should be complemented with UD in field evaluations.

#### KEYWORD

상하류법  
물질균형식  
열회수형 환기설비  
입자 침착

Upstream-Downstream method  
Material Balance Equation  
Heat Recovery Ventilation System  
Particle Deposition

#### ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 20, 2025  
Final revision received Oct. 24, 2025  
Accepted Oct. 30, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

인간은 하루 생활의 약 90%를 실내에서 보내며[1], 이에 따라 실내 공기질 관리는 건강에 중요한 요소이다. 미세먼지는 호흡기 및 순환기계 질환을 유발하고, 장기간 노출 시 폐암 발병 위험을 증가시키는 등 인체에 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2~7]. 한국의 PM<sub>2.5</sub> 연평균 농도는 28.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 OECD 평균의 약 두 배 수준에 달하며, 다수 인구가 World Health Organization (WHO) 권고 기준인 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 농도에 노출되고 있다[8]. 실내공기질을 개선하려면 환기가 필수적이지만, 환기 과정에서 외부 미세먼지가 실내로 유입되는 문제가 발생한다.

2006년 “건축물의 설비기준 등에 관한 규칙” 개정을 통해 100세대 이상의 공동주택에는 기계환기 및 자연환기 설비 설치 의무화되었다. 또한 고효율 기자재 인증제도에 열회수형 환기설비(Heat recovery ventilation system, HRV)가 포함되면서, 공동주택을 중심으로 열회수형 환기설비 보급이 확대되었다[9]. 열회수형 환기설비는 외기를 도입하면서 냉·난방 부하를 저감할 수 있는 장점이 있으며, 동시에 필터를 통해 실외 미세먼지의 유입을 차단할 수 있다[10]. 그러나 열회수형 환기설비 가동에 따른 미세먼지 여과 성능은 필터

외에도 열교환소자 내부 및 덕트에 의한 입자 침착(Deposition) 등 다양한 요인의 영향을 받을 수 있다.

국내 선행연구에서는 열회수형 환기설비의 필터 여과 효율을 주로 실험챔버 조건에서 상하류법으로 평가하였다[11~13]. 상하류법은 필터를 기준으로 환기설비 내부의 상류·하류 입자 농도를 직접 비교하여 여과 효율을 산정하기 때문에 측정 절차가 단순하고 외부 환경변화의 영향을 상대적으로 덜 받는 장점이 있다. 반면, 덕트 내 난류 형성이나 비등속 샘플링으로 인한 오차 발생 가능성이 한계로 지적된다. 한편, 물질균형식 방법은 침착률과 침기율 등을 현장에서 별도로 측정해야 하며, 이 과정에서 발생하는 불확실성으로 인해 오차가 발생할 수 있다. 특히 기존 연구는 필터 성능에 집중하였는데, 실제 환경에서는 덕트 길이에 의해 발생하는 추가적인 입자 제거 효과가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 공동주택에 설치한 열회수형 환기설비를 대상으로 물질균형식 방법과 상하류법을 적용하였고, 덕트 길이에 따른 미세먼지 여과 효율 변화를 평가하였다. 이를 통해 필터 효율뿐만 아니라 덕트 구간에서 발생하는 입자 침착 효과를 구체적으로 확인하고, 현장에서의 열회수형 환기설비 미세먼지 여과 효율 평가 시 고려해야 할 요소를 제시하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 측정개요

#### 1) 측정 건물

측정 건물은 일반적인 공동주택 구조로 경기도 고양시에 위치한 실험용 주택이다. 지상 4층 규모이고 동일한 구조의 2개 세대가 각 층마다 있는 구성이다. 4층의 세대를 사용하였고, 남측에 거실과 방 2개, 북측에 방 1개로 되어있다. 측정 세대의 바닥면적은 68.5m<sup>2</sup>, 층고는 2.3m이다. Fig. 1.은 측정 건물 및 측정 세대의 거실 사진이다.

#### 2) 실험 개요

실험은 두 기간으로 나누어 진행하였다. 물질균형식 방법은 2024년 1월 30일부터 3월 5일 사이에 수행하였고 외부 온도는 2.0±4.3°C이었으며, 외부 습도는 65.8±17.8%이었다. 상하류법은 2024년 12월 26일부터 2025년 1월 6일에 수행하였고, 외부 온도는



Fig. 1. Test building and living room

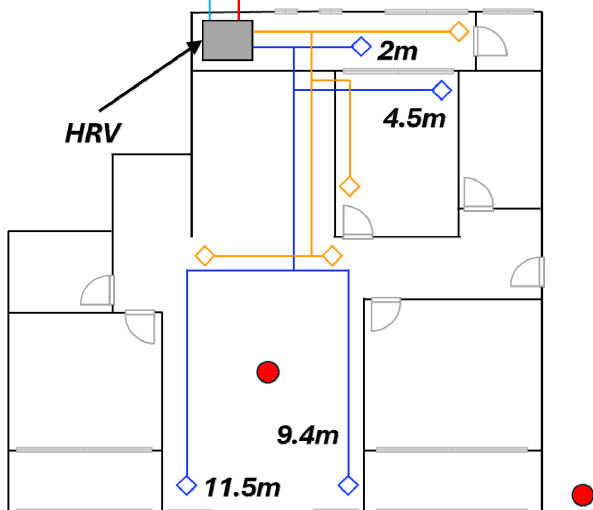


Fig. 2. Floor plan and ductwork diagram of the actual residential unit. The blue lines represent the supply air (SA) ducts, and the yellow lines represent the return air (RA) ducts of the ventilation system. The upstream-downstream method used duct lengths of 2m, 4.5m, and 9.4m, while the material balance equation method used 9.4m and 11.5m ducts. The red dots indicate the sampling locations for the material balance equation method

-1.0±3.8°C이었으며, 외부 습도는 62.0±18.6%이었다.

미세먼지 여과 효율을 위해 미세먼지를 샘플링 하였는데, 모든 여과 효율에 사용한 샘플링 장비는 TSI사의 OPS 3330을 사용하였다. 미세먼지의 측정 입경 구간은 ASHRAE 52.2를 참고하여 12개 구간으로 나누어 측정하였고, 효율 평가 시 3개 그룹으로 묶어서 평가하였다[14]. 상하류법과 물질균형식 방법 모두 외기 미세먼지를 사용하였다.

열회수형 환기설비는 한국 공동주택에 일반적으로 적용하는 형태를 사용하였다. 환기설비의 환기량은 0.5회 환기횟수를 고려하여 80CMH로 설정한 뒤 실험을 진행하였다. 또한 상용 필터를 사용하여 실험을 진행하였는데 필터 효율은 프리(Pre), 미디엄(Medium), HEPA의 세 범주로 구성하였다. 각각 KS B 6141 기준 40%, 90% 수준의 필터, ISO 29463 기준 H13 (HEPA) 수준의 필터를 적용하였다.

### 2.2. 미세먼지 여과 효율 산정

미세먼지 여과 효율은 두가지 방법으로 평가하였다. 실내 미세먼지의 거동을 나타내는 물질균형식(Material balance equation)을 변형하여 미세먼지 여과 효율을 평가하는 물질균형식 방법(Material balance equation method, MB method)와 효율을 측정하고자 하는 부분을 기준으로 상류(Upstream)와 하류(Downstream)의 미세먼지를 측정하여 그 미세먼지 농도의 비로 효율을 평가하는 상하류법(Upstream-Downstream Method, UD method)을 사용하였다. Fig. 2.은 건물 평면도 및 측정 방법의 덕트워크, 샘플링 포인트를 나타낸 다이어그램이다.

#### 1) 물질균형식 방법

물질균형식 방법은 실내 미세먼지의 거동을 나타내는 식을 변형하여 미세먼지의 여과 효율을 추정하는 방법이다. 해당 방법은 여과 효율을 산정하기 위하여 환기설비에 추가적인 샘플링 장치를 설치하지 않아도 되는 장점이 있다. 하지만 여과 효율 산정을 위하여 측정 공간의 침기량과 침착률을 따로 측정해야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 여과 효율을 산정하기 위한 측정 이전에 침기량 및 침착률을 산정하였다. 미세먼지는 두 대의 OPC (Optical particle

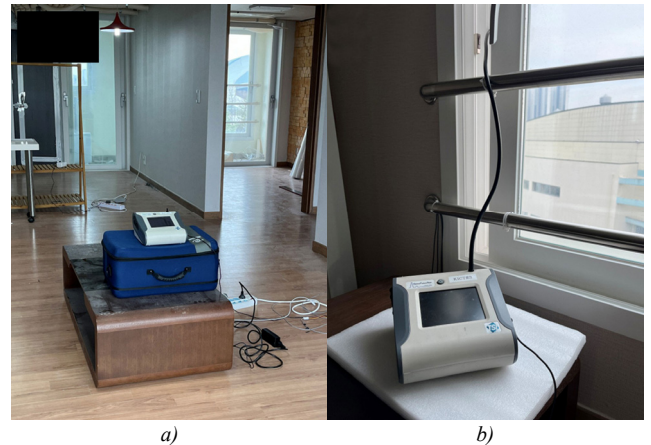


Fig. 3. Installation of measurement instruments for the material balance equation method

counter)를 사용하였고, 실내를 대표할 수 있는 측정 위치로 판단되는 거실과 실외의 미세먼지를 동시에 측정하였다. Fig. 3.은 물질균형식 방법을 위한 OPC 설치 사진이다. 측정 간격은 1분으로 하였고, 총 3개의 필터를 설치하여 환기설비의 미세먼지 여과 효율을 평가하였다. 여과 효율 산정 시 사용한 미세먼지 데이터는 총 측정 구간 중, 외기 농도가 급격하게 변화하지 않는 구간을 사용하였다. Fig. 4.는 본 연구에서 사용한 물질균형식 방법의 실험 다이어그램이다.

열회수형 환기설비가 외기도입 모드로 가동하였을 때, 실내 미세먼지 거동은 (Eq. 1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_{in}(t)}{dt} = a_p C_{out}(t) + (1 - \eta_{MB}) a_{vent} p C_{out}(t) - (k + a + a_{vent}) C_{in}(t) + \frac{S}{V} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서  $t$ 는 시간,  $C_{in}(t)$ 와  $C_{out}(t)$ 은 시간  $t$ 에 해당하는 실내·외 미세먼지의 농도( $\#/cm^3$ ),  $a$ 는 침기에 의한 공기교환율(1/h),  $p$ 는 침투계수(Penetration factor, dimensionless),  $\eta_{MB}$ 는 열회수형 환기설비에 설치된 필터의 여과 효율(%),  $k$ 는 침착률(Deposition rate, 1/h),  $a_{vent}$ 는 열회수형 환기설비에 의한 공기교환율(1/h),  $S$ 는 미세먼지 발생량( $\#/h \cdot m^3$ ),  $V$ 는 측정공간의 체적( $m^3$ )을 의미한다. 이때, 실내 미세먼지 발생량이 없고, 침기에 의한 공기교환율은 무시한다고 가정하였을 때, (Eq. 2)로 정리할 수 있다[15].

$$C_{in}(t) = (1 - \eta_{MB}) a_{vent} C_{out}(t) \Delta t + (1 - (k + a_{vent}) \Delta t) C_{in}(t-1) \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서  $\Delta t$ 는 time step,  $C_{in}(t-1)$ 은  $C_{in}(t)$ 의 1 인터벌 전의 실내 미세먼지 농도를 의미한다. 이때, 미세먼지 여과 효율을 계산하기 위하여 (Eq. 2)를  $\eta$ 에 대해 정리하면 (Eq. 3)과 같다.

$$\eta_{MB} = 1 - \frac{C_{in}(t) - (1 - (k + a_{vent}) \Delta t) C_{in}(t-1)}{a_{vent} C_{out}(t) \Delta t} \quad (\text{Eq. 3})$$

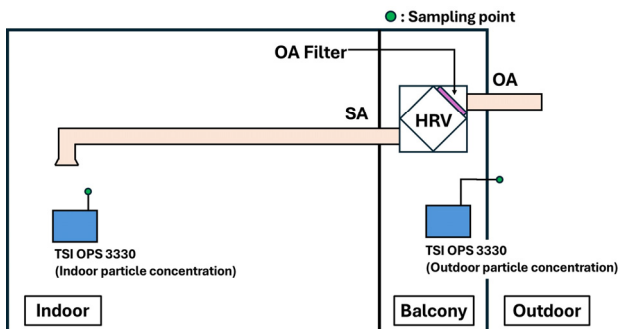


Fig. 4. Schematic diagram of material balance equation method. SA is supply air, OA is outdoor air and HRV is heat recovery ventilator

MB method에 의한 미세먼지 여과 효율 계산 시 침착률과 침기량은 변화하지 않는다고 가정하였다. 이에 대한 세부 내용은 선행연구에 상세히 제시되어 있다[16].

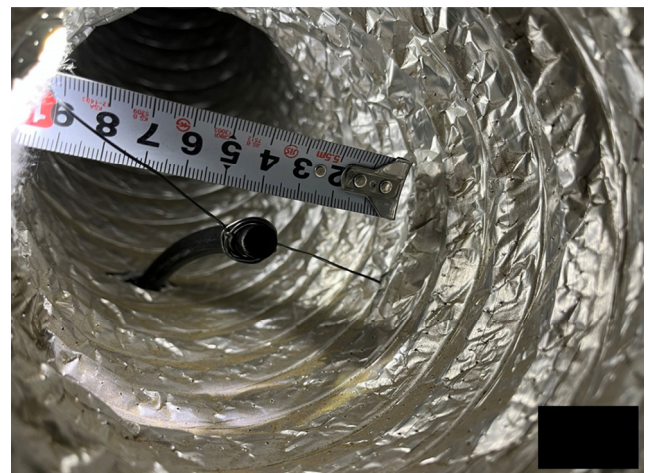
## 2) 상하류법

상하류법은 미세먼지 여과 효율을 측정하고자 하는 지점을 기준으로 상류와 하류의 미세먼지 농도를 측정하여 여과 효율을 산정하는 방법이다. 상하류법은 물질균형식 방법에 비해 측정 시간이 상대적으로 빠르고, 외부 환경의 변화에 큰 영향이 없어 측정하고자 하는 환기설비의 미세먼지 여과 효율을 보다 직관적이고 정확하게 측정할 수 있다. 또한, 하류측 샘플링 위치를 변경하여 원하는 구간의 미세먼지 여과 효율을 종합적으로 측정할 수 있다. 하지만 여과 효율 산정을 위하여 환기설비에 직접적으로 접근하여 샘플링 장비를 설치해야 하고, 덕트 또는 환기설비 내부의 난류나 비등속성(nonisokinetic) 샘플링에 의한 오차가 발생할 수 있다.

덕트 길이가 환기설비의 여과 효율에 미치는 영향을 확인하고자 SA측 샘플링 포인트를 변경하여 상하류법으로 측정하였다. 환기설비로부터 SA 토출구까지의 덕트 길이는 2m, 4.5m, 9.4m이다. 각 측정마다 15분 동안 측정하였고, 측정 이전에 약 5분간 환기설비를 가동하여 이전 측정에서 유입된 미세먼지의 영향을 최소화하고자



a) Downstream sampling      b) Upstream sampling



c) Fixing of sampling tube inside the duct

Fig. 5. Setup of measurement instruments for the upstream-downstream method

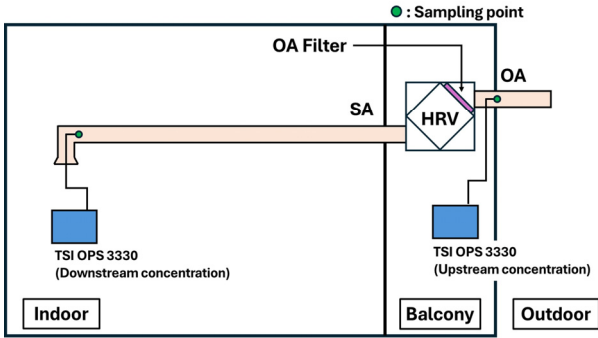


Fig. 6. Schematic diagram of upstream-downstream method. SA is supply air, OA is outdoor air and HRV is heat recovery ventilation system

하였다. 샘플링을 위한 샘플링 튜브는 유량 방향에 수평하도록 설치하였고, 덕트 중앙에 위치하도록 하였다. Fig. 5.는 상하류법을 측정하기 위한 장비 세팅 사진이다. 또한 3개의 필터를 설치하여 미세먼지 여과 효율을 확인하였다. 40%, 90% 필터는 5회 측정하였고, HEPA 필터는 2회 측정하여 그 값의 평균을 사용하였다. HEPA 필터는 여과 효율이 높아 측정하였을 때 편차가 작아 2회만 측정하였다. Fig. 6.은 상하류법의 실험 다이어그램이다. (Eq. 4)는 상하류법의 수식을 나타낸다[17~19].

$$\eta_{UD} = 1 - \frac{C_{Downstream}(t)}{C_{Upstream}(t)} \quad (Eq. 4)$$

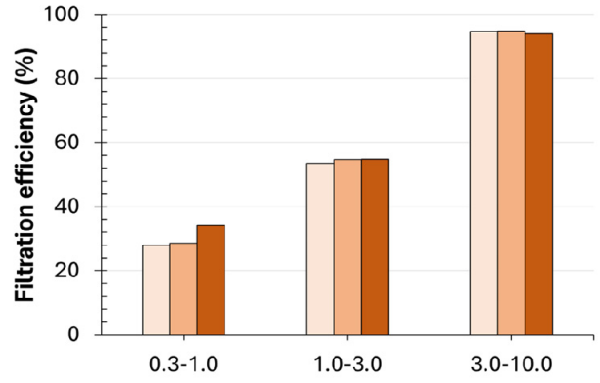
여기서,  $\eta_{UD}$ 는 상하류법으로 구한 열회수형 환기설비의 미세먼지 여과 효율이고(%),  $C_{Upstream}(t)$ 와  $C_{Downstream}(t)$ 는 환기설비 기준, 상류와 하류의 미세먼지 농도를 의미한다.

### 3. 연구결과

#### 3.1. 덕트에 의한 미세먼지 여과 효율 변화

Fig. 7.은 상하류법을 이용하여 측정한 덕트 길이에 따른 열회수형 환기설비의 미세먼지 여과 효율 변화를 나타낸다. 필터 등급이 낮은 40% 필터의 경우, 0.3-1.0 $\mu$ m 구간에서 2m 덕트는 27.9%, 9.4m 덕트에서 34.2%로 6.3% 증가하였다. 1.0-3.0 $\mu$ m 구간에서도 유사한 경향을 보여 효율이 70.8%에서 77.2%로 약 6.4% 증가하였다. 반면 3.0-10.0 $\mu$ m 구간에서는 대부분의 큰 입자가 이미 필터에 의해 제거되었기 때문에 길이에 따른 차이가 뚜렷하지 않았다. 90% 필터와 HEPA 필터에서는 모든 입경 구간에서 덕트 길이에 따른 차이가 0.1% 이하로 나타났으며, 이는 고효율 필터의 경우 덕트에서의 추가 제거 효과가 미미함을 의미한다.

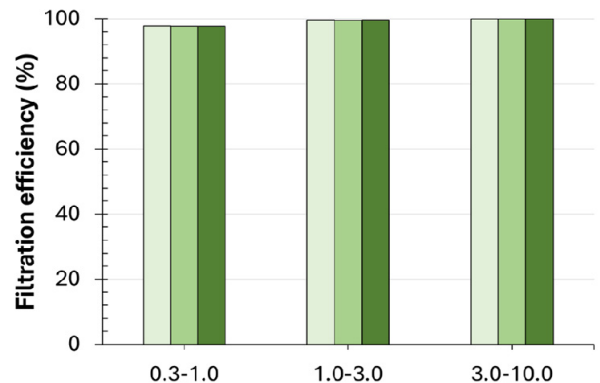
이러한 결과는 덕트 길이가 길어질수록 전체 여과 효율이 증가할 수 있음을 시사하며, 특히 낮은 효율의 필터에서는 덕트 구간 영향이 상대적으로 크게 나타남을 보여준다. 이는 덕트 내부 벽면에서의 입자 침착(Deposition)에 의해 일부 입자가 추가적으로 제거되었기 때문으로 판단된다. 이와 유사하게, 선행연구에서 덕트 길이 증가나



Particle diameter ( $\mu$ m)

2m 4.5m 9.4m

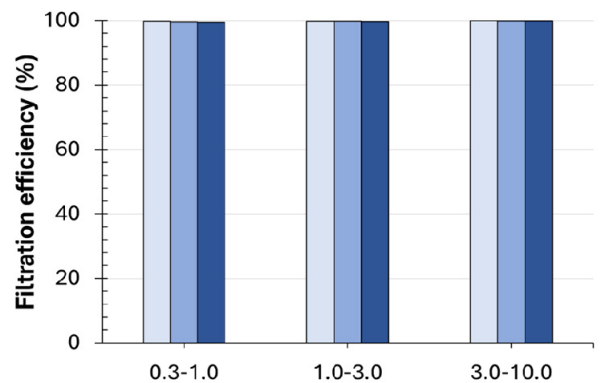
a) 40% filter



Particle diameter ( $\mu$ m)

2m 4.5m 9.4m

b) 90% filter



Particle diameter ( $\mu$ m)

2m 4.5m 9.4m

c) HEPA filter

Fig. 7. Filtration efficiency of the heat recovery ventilator measured by the upstream-downstream method at different duct lengths

단면적 감소에 따라 침착물이 증가하는 경향이 보고된 바 있다 [20~22]. Table 1.은 상하류법으로 측정한 덕트 길이별 필터 여과 효율을 나타낸다.

#### 3.2. 물질균형식 방법과 상하류법

Fig. 8.은 상하류법과 물질균형식 방법으로 측정한 열회수형 환기

Table 1. Filtration efficiency of the heat recovery ventilation system measured by the upstream-downstream method at different duct lengths

Filter efficiency	Duct length	Measured filtration efficiency		
		0.3-1.0 $\mu\text{m}$	1.0-3.0 $\mu\text{m}$	3.0-10.0 $\mu\text{m}$
40%	2m	27.9%	53.4%	94.7%
	4.5m	28.6%	54.7%	94.8%
	9.4m	34.2%	54.8%	94.0%
90%	2m	97.8%	99.7%	100.0%
	4.5m	97.7%	99.6%	100.0%
	9.4m	97.7%	99.6%	100.0%
HEPA	2m	99.8%	99.8%	100.0%
	4.5m	99.5%	99.7%	99.9%
	9.4m	99.5%	99.7%	99.9%

설비의 미세먼지 여과 효율을 나타낸 그래프이다. 상하류법은 해방법을 대표하는 값인 9.4m 결과를 사용하였다. 두 방법은 전반적인 추세가 유사하였지만, 절대값에서는 차이를 보였다. 0.3-1.0 $\mu\text{m}$  구간 결과를 보면, 40% 필터에서는 물질균형식 방법이 상하류법보다 7.8% 높았고, 90% 필터와 HEPA 필터에서는 각각 12.0%, 10.4% 낮았다. 반면, 3.0-10.0 $\mu\text{m}$  구간에서는 두 방법 간의 차이가 최대 0.9%로 매우 작았다. 즉, 작은 입경 구간에서는 두 방법 간 차이가 크게 나타났으나, 큰 입경 구간에서는 차이가 작은 경향을 보였다. 이러한 차이는 0.3-1.0 $\mu\text{m}$  구간 미세먼지가 인체에 특히 유해하고, 필터 평가 시 물질균형식 방법만으로 성능을 과대·과소평가할 가능성을 시사한다. 특히 낮은 효율의 필터에서는 외기 변동에 따른 오차 영향이 커 상대적으로 물질균형식 방법 결과가 높게 나타나는 경향을 보였다.

현장에서 열회수형 환기설비의 미세먼지 여과 효율 평가를 물질균형식 방법만으로 수행하는 데에는 여러 한계가 존재한다. 첫째, 물질균형식 방법은 모든 공간이 균일하게 섞인 well-mixed 조건을 가정한다. 그러나 실제 환경은 well-mixed 조건을 만족시키기는 어렵다. 둘째, 침기량과 침착률을 별도로 산정해야 하며, 이는 비재실 조건에서 장시간 측정을 요구하므로 실제 환경에서는 적용이 제한된다. 셋째, 물질균형식을 변형하여 산정하는 방식은 환기설비 내부에서 발생하는 침착이나 누설 등의 효과를 반영하기 어렵다. 이로 인해 외부 환경변화와 환기설비에 의한 효율 변화를 구분하지 못하므로, 필터 효율 산정에 불확실성을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 물질균형식 방법은 상하류법과 비교할 때 현장평가에서 신뢰도가 낮은 것으로 판단된다.

상하류법은 현장측정 시 여러 가지 장점이 있다. 첫째, 현장에서 상하류법 측정 시 재실 조건의 변화에 영향을 받지 않는다. 물질균형식 방법은 재실자의 행동 패턴과 실내 발생원이 측정값에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 일반적으로 비재실 조건에서 수행한다. 반면 상하류법은 환기설비 내부 농도를 직접 측정하기 때문에 재실자 유무와 관계없이 측정이 가능하므로 보다 현장 측정에 적합한 방식으로 볼 수 있다. 둘째, 측정시간이 상대적으로 짧아 외부 미세먼지 농도 변화에 영향을 적게 받는다. 물질균형식 방법은 정상상태(Steady-state)를 가정하므로, 실내 미세먼지 농도가 안정화 되는 구간을 확보해야 한다. 외기 농도의 변동이 큰 경우 안정화 구간 설정이 어려워 측정

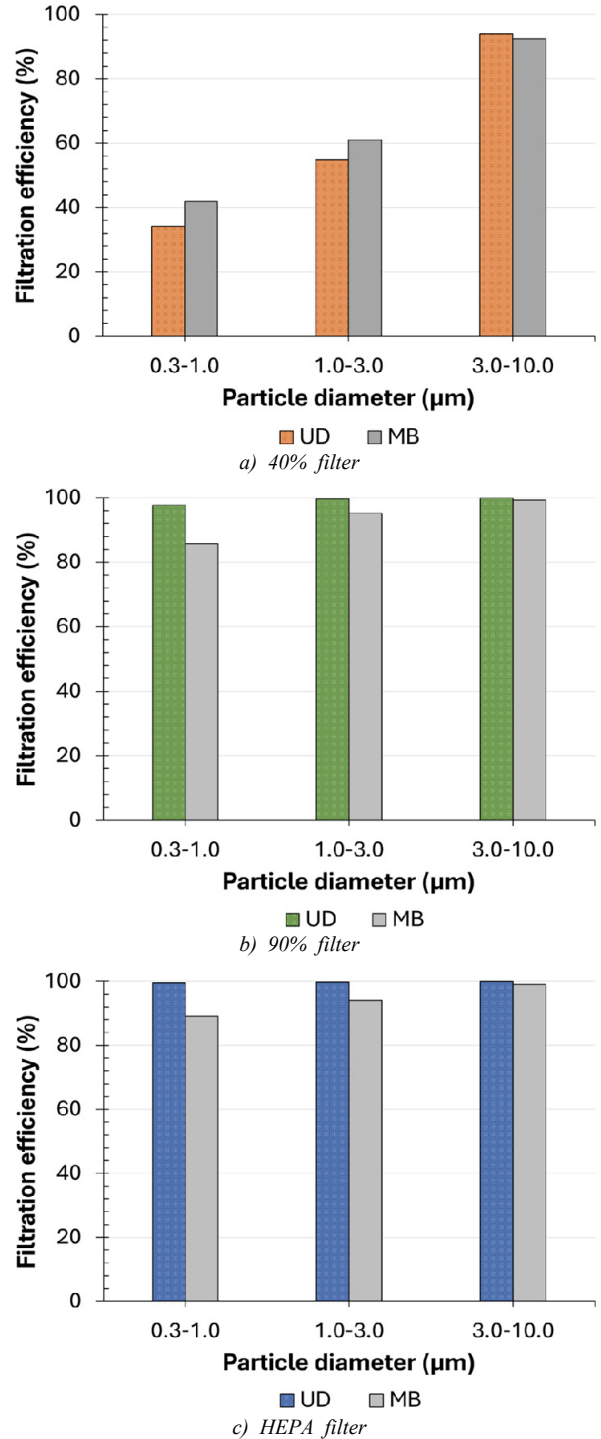


Fig. 8. Comparison of filtration efficiency between the upstream-downstream method (UD) and the material balance equation method (MB). The representative value of 9.4m was used for the upstream-downstream method

시간이 증가하는 한계가 존재하였다. 반면 상하류법은 약 15분 간의 측정으로 결과 도출이 가능하였다. 셋째, 샘플링 포인트 변경을 통하여 환기설비 내부 요소에 의한 영향을 명확하게 확인할 수 있다. 현장에서의 필터 여과 효율은 현장 특성에 의하여 변화된다. 이는 챔버에서 측정한 필터 여과 효율과 현장에 실제로 적용된 필터 여과 효율이 서로 달라질 수 있음을 의미한다. 따라서 상하류법을 사용하면

현장 조건에 따른 다양한 상황에서의 여과 효율을 직접적으로 비교 및 평가할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실물 공동주택 구조의 실험용 주택에 설치된 열회수형 환기설비를 대상으로 상하류법과 물질균형식을 병행하여 현장 조건에서의 미세먼지 여과 효율을 평가하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 열회수형 환기장치의 미세먼지 여과 효율은 덕트 길이에 따라 변동하는 경향을 보였다. 40% 필터의 경우 0.3-1.0 $\mu$ m 구간에서 2m 덕트 27.9%, 9.4m 덕트 34.2%로 약 6.3% 증가하였다. 반면 90% 및 HEPA 필터는 0.1% 이하의 미세한 차이를 보였다. 이는 덕트 내부 벽면의 입자 침착 효과가 낮은 효율 필터에서 더 크게 작용했기 때문으로 판단된다.
- 2) 두 평가 방법의 비교 결과, 물질균형식 방법은 필터 등급과 입경에 따라 상하류법 대비 과대 또는 과소평가되는 경향을 보였다. 40% 필터에서는 물질균형식 방법이 약 7.8% 높게, 90% 및 HEPA 필터에서는 각각 12.0%, 10.4% 낮게 산정되었다. 이러한 차이는 침착률, 침기율 등의 현장 측정 불확실성과 외기 상태 변화에 따라 발생한 것으로 추정된다.
- 3) 상하류법은 단시간 내 측정이 가능하고 외기 농도 변동에 덜 민감하여 현장 평가에 보다 적합한 방법으로 확인되었다. 반면 물질균형식 방법은 장기 측정에 유리하나, 외기 미세먼지 농도의 변동 및 이로 인한 변수(침착률, 침기량) 산정의 불확실성으로 인한 오차 가능성이 존재한다.
- 4) 따라서 현장 조건에서의 여과 성능 평가는 두 방법을 병행 적용하여 상호 보완하는 접근이 필요하며, 특히 상하류법은 현장 평가의 표준 기준으로 활용할 수 있는 방법으로 판단된다. 또한, 열회수형 환기장치의 실질적인 여과 성능을 평가할 때는 덕트 구조와 길이에 따른 추가 입자 제거 효과를 함께 고려해야 한다.

#### Acknowledgement

본 연구는 2025학년도 대진대학교 학술연구비 지원으로 이루어졌습니다.

#### References

[1] 통계청, 2024년 생활시간조사 결과, [https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060400&bid=220&act=view&list\\_no=437764](https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060400&bid=220&act=view&list_no=437764), 2025.07.28. // (Statistics Korea, 2024 Time use survey report, [https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060400&bid=220&act=view&list\\_no=437764](https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060400&bid=220&act=view&list_no=437764), 2025.07.28.)

[2] J.S. Apte et al., Ambient PM<sub>2.5</sub> reduces global and regional life expectancy, *Environmental Science & Technology Letters*, 5(9), 2018, pp.546-551.

[3] R.D. Brook et al., Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association, *Circulation*, 121(21), 2010, pp.2331-2378.

[4] K.A. Miller et al., Long-term exposure to air pollution and incidence of

cardiovascular events in women, *New England Journal of Medicine*, 356(5), 2007, pp.447-458.

[5] C.A. Pope III et al., Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, *JAMA*, 287(9), 2002, pp.1132-1141.

[6] C.A. Pope III, D.W. Dockery, Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 2006, pp.709-742.

[7] Y.F. Xing et al., The impact of PM<sub>2.5</sub> on the human respiratory system, *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), 2016, pp.E69-E74.

[8] World Health Organization, WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, World Health Organization, 2021.

[9] 박병용, 조진균, 오병철, 열회수형환기설비의 성능 현황 및 평가방법에 관한 연구, *설비공학논문집*, 제34권 제3호, 2022, pp.145-153. // (B.Y. Park, J.K. Cho, B.C. Oh, A study on performance status and test standard of heat recovery ventilation system, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 34(3), 2022, pp.145-153.)

[10] 조진균, 신철웅, 건축물 미세먼지 저감을 위한 실외유입과 실내발생의 경로 및 대응제품의 성능기준 조사연구, *설비공학논문집*, 제31권 제7호, 2019, pp.332-341. // (J.K. Cho, C.W. Shin, A study on indoor sources-outdoor penetration pathways and performance options on products to counter against the fine dust particle, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 31(7), 2019, pp.332-341.)

[11] 유정연, 배상환, 열회수형 환기설비의 미세먼지 집진효율 평가 및 개선방안, *KIEAE Journal*, 제24권 제1호, 2024, pp.63-69. // (J.Y. Yu, S.H. Bae, Evaluation and improvement plan for fine dust collection efficiency of heat recovery ventilation system, *KIEAE Journal*, 24(1), 2024, pp.63-69.)

[12] 조경주, 조동우, 김태연, 열회수 환기설비의 필터성능에 따른 팬동력 변화 및 초미세먼지 제거효과 실험 연구 - 열회수 환기설비의 내기순환모드를 중심으로, *KIEAE Journal*, 제20권 제4호, 2020, pp.77-82. // (K.J. Cho, D.W. Cho, T.Y. Kim, Experimental study on the fan power changes and ultra-fine dust removals depending on different filters of heat recovery ventilation systems - Focused on the circulation mode of heat recovery ventilation system, *KIEAE Journal*, 20(4), 2020, pp.77-82.)

[13] 조예림, 성민기, 필터가 장착된 열회수형 환기설비의 미세먼지 제거 성능 실험, *대한건축학회논문집*, 제37권 제10호, 2021, pp.149-157. // (Y.L. Jo, M.K. Sung, Experimental verification for particle removal efficiency of heat recovery ventilation systems with air filters, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 37(10), 2021, pp.149-157.)

[14] ASHRAE, ASHRAE standard 52.2: Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size, ASHRAE, 2017.

[15] S. Park et al., Performance of a heat recovery ventilation system for controlling human exposure to airborne particles in a residential building, *Building and Environment*, 239, 2023, 110412.

[16] 정한웅, 강경모, 열회수형 환기설비의 필터 여과 효율 평가에 관한 연구, *한국건축환경설비학회 논문집*, 제18권 제5호, 2024, pp.401-411. // (H.U. Jeong, K.M. Kang, Investigation of the filtration efficiency in heat recovery ventilation system, *Journal of the Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 18(5), 2024, pp.401-411.)

[17] B. Stephens, J. Siegel, Ultrafine particle removal by residential heating, ventilating, and air-conditioning filters, *Indoor Air*, 23(6), 2013, pp.488-497.

[18] B. Stephens, J.A. Siegel, Comparison of test methods for determining the particle removal efficiency of filters in residential and light-commercial central HVAC systems, *Aerosol Science and Technology*, 46(5), 2012, pp.504-513.

[19] T. Fazli, Y. Zeng, B. Stephens, Fine and ultrafine particle removal efficiency of new residential HVAC filters, *Indoor Air*, 29(4), 2019, pp.656-669.

[20] J. Wu, B. Zhao, Effect of ventilation duct as a particle filter, *Building and Environment*, 42(7), 2007, pp.2523-2529.

[21] M.R. Sippola, W.W. Nazaroff, Experiments measuring particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation ducts, *Aerosol Science and Technology*, 38(9), 2004, pp.914-925.

[22] M.R. Sippola, W.W. Nazaroff, Modeling particle loss in ventilation ducts, *Atmospheric Environment*, 37(39-40), 2003, pp.5597-5609.